УДК 621.3, 004.94

В.В. Борисов, С.П. Курилин, М.В. Черновалова

АНАЛИЗ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА¹

Борисов Вадим Владимирович, доктор технических наук, окончил Московский энергетический институт (МЭИ), профессор кафедры «Вычислительная техника» филиала ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске. Имеет научные работы в области интеллектуального анализа и моделирования сложных систем и процессов. [e-mail: vbor67@mail.ru].

Курилин Сергей Павлович, доктор технических наук, окончил МЭИ, профессор кафедры «Электромеханические системы» филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. Имеет научные работы в области математического моделирования электромеханических систем. [e-mail: sergkurilin@gmail.com].

Черновалова Маргарита Витальевна, окончила ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», аспирант ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». Имеет научные работы в области создания и развития интеллектуальных методов поддержки принятия решений. [e-mail: 0208margarita@bk.ru].

Аннотация

Ужесточение требований к эффективности и надёжности технических систем предопределяет углублённое исследование электромеханических систем. Исследование предполагает учет неоднородности их физического и векторного пространства в качестве эксплуатационных факторов, оказывающих существенное влияние на показатели энергетической эффективности и надёжности объекта. Предлагаемый топологический подход к исследованию неоднородных электромеханических систем (НЭМС) основывается на анализе их векторного пространства. Анализируются многомерность, неоднородность, составной характер векторного пространства. Приводятся характерные примеры ограничений, накладываемых на векторы пространства схемами соединений трёхфазных и многофазных обмоток НЭМС. Представляется главное энергетическое поле и формулируется принцип формирования эффективного энергетического состояния НЭМС. Описываются задачи и способ реализации эксплуатационной диагностики НЭМС на основе топологического подхода. В условиях неопределённости, а также разнокачественности, недостаточного объема данных обоснована целесообразность совместного использования методов нечеткого когнитивного и логического анализа и моделирования. Предложена каскадная гибридная модель, а также основанные на ней способы исследования векторного пространства и эксплуатационной диагностики НЭМС.

Ключевые слова: неоднородная электромеханическая система, топологический подход, эксплуатационная диагностика, нечеткая когнитивно-логическая модель, нечеткая логическая модель.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-3-65-103-110

ANALYSIS OF INHOMOGENEOUS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BASED ON A TOPOLOGICAL APPROACH

Vadim Vladimirovich Borisov, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from Moscow Power Engineering Institute (MPEI); Professor of the Department of Computer Engineering at the Smolensk Branch of National Research University "MPEI"; an author of research papers in the field of data mining and modeling of complex systems and processes. e-mail: vbor67@mail.ru.

Sergei Pavlovich Kurilin, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from Moscow Power Engineering Institute; Professor of the Department of Electromechanical Systems at the Smolensk Branch of National Research University "MPEI"; an author of research papers in the field of mathematical modeling of electromechanical systems. e-mail: sergkurilin@gmail.com.

Margarita Vitalevna Chernovalova, graduated from National Research University "Moscow Power Engineering Institute"; Postgraduate Student at National Research University "MPEI"; an author of research papers in the field of creation and development of intelligent decision support methods. e-mail: 0208margarita@bk.ru.

¹

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-01-00283, № 18-07-00928.

Abstract

Stricter requirements for the efficiency and reliability of technical systems predetermine an in-depth study of electromechanical systems. The study involves taking into account the heterogeneity of their physical and vector space as operational factors that have a significant impact on the energy efficiency and reliability of the object. The proposed topological approach to the study of heterogeneous electromechanical systems (NEMS) is based on the analysis of their vector space. The multidimensionality, heterogeneity, and composite nature of the vector space are analyzed. Typical examples of the restrictions imposed on space vectors by the connection schemes of three-phase and multiphase NEMS windings are given. The main energy field is presented and the principle of the formation of the effective energy state of NEMS is formulated. Describes the tasks and method of implementing the operational diagnostics of NEMS based on the topological approach. In conditions of uncertainty, as well as heterogeneous quality, insufficient data, the feasibility of sharing the methods of fuzzy cognitive and logical analysis and modeling is substantiated. A cascade hybrid model is proposed, as well as methods for studying the vector space and operational diagnostics of NEMS based on it.

Keywords: heterogeneous electromechanical system, topological approach, operational diagnostics, fuzzy cognitive-logical model, fuzzy logical model.

ВВЕДЕНИЕ

Электромеханические системы являются силовыми элементами электрооборудования технических систем. Они вносят весомый вклад в показатели энергетической эффективности и надёжности технических систем. Характерное для текущего момента ужесточение требований к эффективности и надёжности технических систем предопределяет углублённое исследование электромеханических систем. Исследование предполагает учет неоднородности их физического пространства и, как следствие, неоднородности векторного пространства в качестве эксплуатационных факторов, оказывающих существенное влияние на показатели энергетической эффективности и надёжности объекта. При этом имеется в виду изначально присущая электромеханической системе неоднородность, связанная с различными реакциями системы на различные спектральные или различные компонентные составы токов. Также имеется в виду неоднородность, приобретённая электромеханической системой в процессе эксплуатации под действием эксплуатационного старения. Приводимые ниже сведения относятся к наиболее массовому виду электромеханических систем – асинхронным электродвигателям (АЭД) с короткозамкнутым ротором. Вместе с тем, применённые в исследовании подходы могут быть распространены и на другие виды электромеханических систем.

Классическая теория электромеханических систем в её физико-технической и математической концепциях [1] корректна и адекватна для АЭД при соблюдении следующих двух условий. Во-первых, все векторы электромагнитных величин должны быть сосредоточены в одной плоскости векторного пространства, называемой рабочей областью, во-вторых, данная область должна быть параметрически однородна. Таким образом, в топологическом отношении классическая теория электромеханических систем является «плоской». Она оперирует двухкомпонентными векторами электромагнитных величин в ортогональных базисах рабочей области и не описывает многомерные электромагнитные состояния

объектов. Для современных теоретических и прикладных задач, связанных с многомерной параметрической неоднородностью и многомерным управлением [2], необходимо расширение размерности векторного пространства АЭД до ранга его параметрической матрицы. Такое расширение в наиболее систематизированном виде было предпринято в [3], что отвечает задачам, связанным с многомерной параметрической неоднородностью и многомерным управлением объектом.

Предлагаемый топологический подход к исследованию неоднородных электромеханических систем (НЭМС) основывается на анализе их векторного пространства, в котором сами НЭМС представляются линейными операторами. В настоящее время топологический подход к исследованию НЭМС развивается по двум конвергентным направлениям – исследование векторного пространства и эксплуатационная диагностика НЭМС.

В сфере исследования векторного пространства [4] два вопроса являются ключевыми: во-первых, какие состояния НЭМС в нём разрешены, во-вторых, какие из них наиболее эффективны. Это направление ориентировано на задачи повышения эффективности НЭМС, решаемые как средствами управления, так и проектно-конструкторскими средствами.

В области эксплуатационной диагностики [5] основными являются следующие вопросы: во-первых, каково текущее техническое состояние НЭМС, во-вторых, каковы риски продолжения её эксплуатации. Данное направление исследований ориентировано на организацию эффективной эксплуатации НЭМС путём реализации определённых стратегий эксплуатации электрооборудования технических систем. При этом задачи обоих направлений являются комплексными и обладают нелинейным характером и сложностью учета опосредованного взаимовлияния параметров векторного пространства в условиях неопределённости; разноточностью, недостаточным объёмом данных. Все эти факторы позволяют обосновать целесообразность совместного использования нечеткого когнитивного и

логического подходов [6] для решения указанных выше комплексных задач. В библиографии к статье представлены некоторые другие работы [7–13] по затронутым вопросам.

Задача данной статьи состоит в том, чтобы познакомить читателя с предлагаемым топологическим подходом к исследованию НЭМС по обозначенным выше направлениям его развития.

СВОЙСТВА ВЕКТОРНОГО ПРОСТРАНСТВА НЭМС

Математической моделью НЭМС является векторно-матричное выражение

$$u = Z \cdot i$$

или, в более детальной форме записи,

$$\begin{pmatrix} u_S \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{\sigma S} + \frac{d}{dt} M_S & \frac{d}{dt} M_{rS} \\ \frac{d}{dt} M_{Sr} & Z_{\sigma r} + \frac{d}{dt} M_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_S \\ i_r \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где u_S, i_S, i_r – векторы питающего напряжения, тока статора и тока ротора в базисах собственных фазных осей,

$Z_{\sigma S}, Z_{\sigma r}$ – матрицы параметров рассеяния обмоток статора и ротора в тех же базисах;

M_S, M_r – матрицы главных индуктивностей обмоток статора и ротора в тех же базисах;

M_{rS}, M_{Sr} – матрицы взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора.

Согласно выражению (1), векторное пространство НЭМС, соответствующее параметрической матрице Z , является многомерным, неоднородным и составным. Так для АЭД с трёхфазным статором и z_2 -фазным ротором векторное пространство включает в себя два пересекающихся пространства с тремя и z_2 измерениями соответственно [3]. Областью их пересечения, называемой рабочей областью, является двумерное подпространство, в котором частично или полностью сосредоточены все векторы электромагнитных величин, в частности векторы u_S, i_S, i_r и другие. Матрицы взаимной индукции действуют в этом подпространстве и производят операции преобразования базисов. Так, например, для вектора i_r данная операция выглядит как

$$M_{rS} i_r = M_S i_{rS},$$

где i_{rS} – вектор тока z_2 -фазной обмотки ротора в базисе фазных осей трёхфазной обмотки статора.

Исследование субматриц Z , проведенное в [3], свидетельствует об их параметрической неоднородности. Неоднородность выражается в различии собственных значений (характеристических параметров) по главным осям матрицы. Более того, главные матрицы и матрицы взаимной индукции АЭД являются вырожденными. Это означает, что их энергетическая эффективность для определённых векторов тока равна нулю.

Ниже, в качестве иллюстраций, приведены изображения рабочей области векторного пространства трёх-

фазного АЭД с короткозамкнутым ротором из 12 фаз. Изображения даны с позиции наблюдателя, находящегося в одномерном подпространстве «0», ортогональном рабочей области.

На рисунке 1 в виде подобных треугольников приведено изображение рабочей области АЭД со стороны трёхфазной обмотки статора. Номерами 1, 2, 3 обозначены оси фаз обмотки А, В, С. Точками показаны координаты вектора

$$v_2 = (-1 \ 0 \ 1)^{tr},$$

принадлежащего рабочей области. Здесь tr – символ операции транспонирования вектора.

Рис. 1. Рабочая область АЭД со стороны обмотки статора

На рисунке 2 в виде подобных 12-угольников приведено изображение рабочей области АЭД со стороны 12-фазной обмотки ротора. Номерами 1, 2, ...12 обозначены оси фаз обмотки. Точками показаны координаты вектора

$$v_8 = (\sqrt{3} \ 2 \ \sqrt{3} \ 1 \ 0 \ -1 \ -\sqrt{3} \ -2 \ -\sqrt{3} \ -1 \ 0 \ 1)^{tr},$$

принадлежащего рабочей области.

Рис. 2. Рабочая область АЭД со стороны обмотки ротора

Векторы v_2 и v_8 приводимы к одному базису через операцию преобразования базисов. Например, вектор

$v8$ преобразуется в базис трёхмерного пространства операций

$$v8_3 = V_{12 \rightarrow 3} \cdot v8,$$

где $V_{12 \rightarrow 3}$ матрица преобразования базисов, содержащая 3 строки и 12 столбцов. Физически данная операция выполняется матрицей M_{rs} . Важно подчеркнуть, что операция осуществима только благодаря наличию рабочей области, общей для обоих базисов.

На компонентный состав векторного пространства НЭМС накладываются ограничения, связанные со способом электрического соединения фаз её обмоток. Фазы обмотки статора НЭМС имеют топологию «симметричная трёхлучевая звезда» и соединяются в схему «звезда» или «треугольник». Схема соединения фаз A , B , C «звезда» показана на рисунке 3. Для фазных токов схемы справедливо

$$i_A + i_B + i_C \equiv 0.$$

Рис. 3. Схема соединения фаз «звезда»

В соответствии с этим в векторном пространстве той обмотки запрещено появление векторов фазных токов вида

$$i_S = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C) \cdot n_0,$$

где $n_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(1 \ 1 \ 1)^{tr}$ – орт базиса, задающий подпространство «0». Все физически и технически возможные векторы фазного тока данной обмотки располагаются в рабочей области векторного пространства, ортогональной вектору n_0 . Что касается векторов фазных напряжений

$$u_S = (u_A \ u_B \ u_C)^{tr},$$

то они схемой соединения фаз не ограничены и могут располагаться в любой области трёхмерного векторного пространства обмотки.

Обмотке короткозамкнутого ротора, называемой также «клеткой», с z_2 фазами соответствует векторное пространство с z_2 измерениями. Структуры векторов токов, способных существовать в этом пространстве, многообразны, причём их многообразие быстро растёт

с ростом числа фаз клетки. Разумеется, что при этом основной интерес представляют компоненты векторов токов, расположенные в рабочей области и способные трансформироваться в трёхфазную обмотку статора.

Планарная схема соединения фаз клетки короткозамкнутого ротора представлена на рисунке 4. На ней показаны положительные направления фазных токов клетки, в качестве которых приняты токи в короткозамыкающих кольцах

$$i_{yi}, \ i = 1, 2, \dots, z_2.$$

Рис. 4. Схема соединения фаз клетки ротора

Токи в стержнях клетки находятся как разности соседних фазных токов

$$i_i = i_{yi+1} - i_{yi}, \ i = 1, 2, \dots, z_2. \quad (2)$$

При этом в силу замкнутости клетки индекс $z_2 + 1$ совпадает с индексом 1.

В соответствии с выражением (2), векторы токов стержней клетки не содержат составляющих в подпространстве «0», даже в том случае, если эти составляющие имеются у векторов фазных токов. Также не имеют составляющих в подпространстве «0» векторы напряжений на элементах короткозамыкающих колец. Сумма этих напряжений, при отсутствии униполярного возбуждения клетки (что предполагается), равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{z_2} 2 \cdot z_{yi} i_{yi} \equiv 0, \quad (3)$$

где z_{yi} – сопротивление элемента короткозамыкающего кольца с номером i . В силу (3) векторы фазных токов клеток с однородными короткозамыкающими кольцами, у которых $z_{y1} = z_{y2} = z_{y3} = \dots$, не могут иметь компонент в подпространстве «0». У клеток с неоднородными короткозамыкающими кольцами наличие компонент векторов фазных токов в подпространстве «0» не запрещено, и они могут там располагаться частично или полностью.

Параметрической матрице НЭМС по (1) и её субматрицам соответствуют не только векторные пространства, но и энергетические поля определённой конфигурации [3]. Так энергетическое поле матрицы M_S представляет собой скалярное поле в функции вектора тока намагничивающего контура

$$i_m = i_S + M_S^{-1} M_{rs} i_r.$$

Уравнение для поверхностей уровня поля, при условии однородной рабочей области векторного пространства, имеет вид:

$$W_m(i_m) = \lambda_m \frac{1}{2} (i_{m\alpha}^2 + i_{m\beta}^2) = C_w, \quad (4)$$

где λ_m – собственное значение матрицы M_S по любой из главных осей рабочей области; $i_{m\alpha}, i_{m\beta}$ – координаты вектора i_m в ортогональном базисе рабочей области $\alpha\beta$; C_w – величина, задающая энергию поля для фиксированной поверхности уровня. Соответствующие (4) поверхности уровня энергетического поля представляют собой подобные и соосные цилиндрические поверхности. Для значений энергии главного поля C_w и $4C_w$ они показаны на рисунке 5. Разомкнутость поверхностей уровня в направлении вектора n_0 отражает вырожденность матрицы M_S и соответствует предельной степени неоднородности векторного пространства.

Рис. 5. Поверхности уровня главного энергетического поля

На рисунке 5 стрелками показано множество векторов токов i_m . Следует отметить, что согласно (4) только ортогональные поверхности уровня векторы i_m способны изменить энергию поля.

Осознание неоднородности векторного пространства позволило сформулировать общий принцип формирования эффективного энергетического режима НЭМС. Он состоит в формировании векторов электромагнитных величин в областях векторного пространства с максимальными собственными значениями главных матриц и матриц взаимной индукции. При этом векторы должны быть максимально выведены из областей векторного пространства с большими величинами собственных значений матриц рассеяния.

Эксплуатационная диагностика НЭМС

Решение задач по определению текущего технического состояния НЭМС базируется на выражении (1). Исключением вектора i_r модели (1) можно придать следующий вид:

$$i_S = Z_{Sr}^{-1} u_S, \quad (5)$$

где Z_{Sr} – параметрическая матрица НЭМС, полученная путём исключения вектора тока ротора. В соответствии с топологическим подходом, наибольшее влияние на техническое состояние НЭМС имеет рабочая область векторного пространства. В ходе диагностического тестирования НЭМС подвергают воздействию импульсных напряжений, ориентированных по трём направлениям рабочей области векторного пространства x, y, z :

$$u_{Sx} = (\delta(t) \quad -\delta(t) \quad 0)^{tr},$$

$$u_{Sy} = (0 \quad \delta(t) \quad -\delta(t))^{tr},$$

$$u_{Sz} = (-\delta(t) \quad 0 \quad \delta(t))^{tr},$$

где $\delta(t)$ – функция Дирака. Реакциями НЭМС на действие векторов импульсных напряжений, в соответствии с выражением (5), будут три вектора фазных токов:

$$i_{Sx} = (i_A \quad -i_A \quad i_C)^{tr},$$

$$i_{Sy} = (i_A \quad i_B \quad -i_B)^{tr},$$

$$i_{Sz} = (-i_C \quad i_B \quad i_C)^{tr},$$

несущие в себе информацию о текущем состоянии рабочей области. В частности, непропорциональность координат сходственных векторов, например векторов u_{Sx} и i_{Sx} , свидетельствует о параметрической неоднородности рабочей области и частичном выходе вектора тока i_{Sx} за её пределы. Регистрируемые с течением времени эксплуатации изменения сигналов i_{Sx}, i_{Sy}, i_{Sz} свидетельствуют об изменении технических свойств НЭМС в связи с эксплуатационными повреждениями и старением.

При этом:

- наличие пропорциональных изменений сигналов, полученных при последовательных тестированиях, свидетельствует об однородном эксплуатационном старении изделия и его темпах.
- непропорциональное изменение одного из сигналов свидетельствует о появлении повреждения или развита процесса неоднородного старения.
- изменение сигналов при изменении углового положения ротора свидетельствует об изношенности подшипников или повреждениях ротора НЭМС.

Таким образом, топологический подход позволяет получить достаточно детальные сведения о текущем техническом состоянии НЭМС.

КАСКАДНАЯ ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕКТОРНОГО ПРОСТРАНСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ НЭМС

Для решения поставленных задач исследования векторного пространства НЭМС предлагается *каскадная гибридная модель*, включающая в себя:

- в 1-м каскаде – нечеткую когнитивно-логическую модель (НКЛМ) для многомерного прогнозирования параметров векторного пространства НЭМС;

- во 2-м каскаде – нечеткие логические модели для обобщенной оценки состояния НЭМС (вероятности безотказной работы НЭМС и остаточного эксплуатационного ресурса НЭМС).

В работе [6] подробно рассмотрены вопросы создания каскадных моделей, основанных на нечетком подходе и на методах гибридизации и комплексирования нечетких моделей. Кроме того, предложены НКЛМ, которые взяты за основу для модели 1-го каскада, предназначенной для многомерного прогнозирования параметров векторного пространства НЭМС.

В формализованном виде НКЛМ можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} FRBCM &= \langle C, W \rangle, \\ C &= \{C_j | j \in 1..N\}, \\ W &= \{W_{ij} | i, j \in 1..N\}, N = |C|, \\ \forall j \in 1..N \quad C_j &= \langle AG_j, OUT_j \rangle, \\ OUT_j &= \left\{ OUT_j^{(t-l_j)} \middle| l_j = 0..L_j \right\}, \\ \forall i, j \in 1..N \quad W_{ij} &= \left\{ w_{ij}^{(t-l_j)} \middle| l_j = 0..L_j \right\}. \end{aligned}$$

Здесь C – множество концептов НКЛМ, которые задают параметры векторного пространства НЭМС; W – совокупность отношений непосредственного влияния между всеми парами концептов НКЛМ. Каждый концепт C_j осуществляет агрегирование влияний со стороны других концептов НКЛМ, а также реализуют преобразования (посредством соответствующей ему нечеткой логической модели AG_j). В качестве моделей AG_j могут быть использованы модели ANFIS-типа (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System).

Каждое подмножество W_{ij} характеризует набор степеней влияния $w_{ij}^{(t-l_j)}$ концепта C_i на концепт-приемник C_j с учетом «глубины ретроспективы» i -го параметра НЭМС. На выходе концепта C_j формируется значение соответствующего j -го параметра НЭМС в t -й момент модельного времени $OUT_j^{(t)}$.

В качестве двух моделей 2-го каскада предлагаемой каскадной гибридной модели, предназначенных для

обобщенной оценки состояния НЭМС (а именно, вероятности безотказной работы НЭМС и остаточного эксплуатационного ресурса НЭМС), предлагается использовать нечеткие логические модели.

При этом на входы нечетких логических моделей 2-го каскада подаются выходные значения $OUT_j^{(t)}$ концептов C_j , $j \in 1..N$ НКЛМ, а на выходах этих моделей динамически (в соответствии с тактами модельного времени) формируются обобщенные оценки состояния НЭМС в виде значений: вероятности безотказной работы НЭМС и остаточного эксплуатационного ресурса НЭМС. Также использование предлагаемых каскадных моделей позволит определять темпы эксплуатационного старения и давать прогнозные оценки вероятности безотказной работы и остаточного ресурса НЭМС.

Предлагаемую каскадную гибридную модель целесообразно использовать и для решения задач эксплуатационной диагностики НЭМС. Для этого разработан двухэтапный способ решения обратной задачи с использованием предлагаемой каскадной модели. На 1-м этапе выполняется обратный нечеткий вывод для каждой нечеткой логической модели 2-го каскада. Он сводится к поиску значений входных параметров НЭМС по заданным значениям обобщенных оценок состояния НЭМС (вероятности безотказной работы и остаточного эксплуатационного ресурса НЭМС). На втором этапе решается обратная задача идентификации траекторий ретроспективного изменения параметров векторного пространства на заданную «глубину» такой ретроспективы с использованием НКЛМ 1-го каскада.

Таким образом, по полученным результатам можно не только определить отдельный «фазовый портрет» векторного пространства, приводящий к рискам эксплуатации НЭМС, но и возможно восстановить всю предысторию возникновения негативных технических состояний НЭМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от классической теории топологический подход осуществляет расширение размерности векторного пространства НЭМС до ранга её параметрической матрицы. Это отвечает проблематике современных задач, связанных с многомерной параметрической неоднородностью и многомерным управлением НЭМС. Топологический подход постулирует многомерность, неоднородность и составной характер векторного пространства НЭМС. При этом на компонентный состав векторного пространства НЭМС накладываются ограничения, связанные со способом электрического соединения фаз её обмоток. Математическая модель НЭМС связывает в векторном пространстве не только векторные множества электромагнитных величин, но и энергетические поля определённой конфигурации. Постулирование неоднородности векторного пространства позволило сформулировать общий принцип формирования эффективного энергетического режима НЭМС. Топологический метод эксплуатационной диагностики даёт

возможность получить детальные сведения о текущем техническом состоянии НЭМС и на их основе произвести оценку риска продолжения её эксплуатации. В условиях неопределенности, а также разнокачественности, недостаточного объема данных, обоснована целесообразность совместного использования методов нечеткого когнитивного и логического анализа и моделирования. Представленный подход рекомендуется для решения научно-технических задач, связанных с многомерным управлением и эксплуатационной диагностикой НЭМС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины : 2-е издание, перераб. и доп. в 2 т. Т. 1. М: Издательский дом МЭИ, 2004. 652 с.
2. Нос О.В. Математическая модель асинхронного двигателя в линейных пространствах, связанных со статором и ротором // Изв. вузов. Электромеханика. 2008. № 2. С. 14–20.
3. Курилин С.П., Денисов В.Н. Топологические аспекты теории асинхронных электрических машин. Смоленск : издательство УНИВЕРСУМ, 2019. 200 с.
4. Vector Space as an Area of the Operation Risks Characteristics for Asynchronous Electric Machines / S.P. Kurillin, V.N. Denisov, M.I. Dli, V.I. Bobkov // Mechanical Science and Technology Update, 23–24 April 2019, Omsk, Russian Federation // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019. pp. 052017. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052017.
5. A Method for the Operational Diagnostics of Induction Motors / S.P. Kurilin, V.N. Denisov, M.I. Dli, V.I. Bobkov // AIP Conference Proceedings 2176(1):040008. 2019. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5135157> (дата обращения: 15.05.2020).
6. Борисов В.В., Дли М.И., Бобков В.И. Модель комплексного управления рисками при обеспечении ресурсо- и энергосбережения процессов на примере сложных теплотехнологических систем // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 101–109.
7. Fomin I., Ivaschenko V., Shulga T. The Mathematical Models and Algorithms of Operational Control for Equipment TPP // Journal of Applied Informatics. 2018. Vol. 13, no. 3 (75). pp. 24–34.
8. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости ЭлектроТехники. 2005. № 1 (31). С. 50–52.
9. Yu M., Lee M. Fault Detection and Isolation in a Nonlinear Electromechanical System // 2017 International Sensing, Diagnostics, Prediction and Control (SDPC) Conference. 2017. pp. 264–268. DOI: 10.1109 / SDPC.2017.58.
10. Veresnikov G.S., Skryabin A.V. A System for Monitoring the Technical Condition of an Electromechanical Drive Based on Data Mining Methods // 2018 Eleventh International Conference «Management of Large-Scale Development of Systems» (MLSD), 2018. pp. 1–4. DOI: 10.1109 / MLSD.2018.8551829.

11. Палюх Б.В., Шпрекхер Д.М., Богатилов В.Н. Диагностика электромеханических систем на основе нейросетевых технологий // Программные продукты и системы / Software & Systems. 2015. № 3 (111). С. 5–11. DOI: 10.15827/0236-235X.111.005-011

12. Shprekher D.M., Kolesnikov E.B. The Remote Method of Diagnosing the Technical Condition of Complex Electromechanical Systems // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2018. pp. 1–3. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602600.

13. Semenov V., Lebedev I., Sukhoparov M. Identification of the State of Individual Elements of Cyber-Physical Systems Based on External Behavioral Characteristics // Journal of Applied Informatics. 2018. Vol. 13, no. 5 (77). pp. 72–83.

REFERENCES

1. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny*. 2-e izdanie, pererab. i dop. v 2 t. T. 1. [Electrical Machinery. 2nd edition revised and enlarged in two volumes. Vol. 1]. Moscow, MEI Press, 2004. 652 p.
2. Nos O.V. Matematicheskaya model asinkhronnogo dvigatelya v lineinykh prostranstvakh, svyazannykh so statorom i rotorom [Mathematical Model of an Asynchronous Motor in Vector Spaces Linked with Stator and Rotor]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2008, no. 2, pp. 14–20.
3. Kurilin S.P., Denisov V.N. *Topologicheskie aspekty teorii asinkhronnykh elektricheskikh mashin* [Topological Aspects of the Theory of Asynchronous Electrical Machines]. Smolensk, Universum Press, 2019. 200 p.
4. Kurilin S.P., Denisov V.N., Dli M.I., Bobkov V.I. Vector Space as an Area of the Operation Risks Characteristics for Asynchronous Electric Machines. Mechanical Science and Technology Update, 23–24 April 2019, Omsk, Russian Federation. *IOP Conf. Series. Journal of Physics. Conf. Series*. 2019, pp. 052017. DOI:10.1088/1742-6596/1260/5/052017.
5. Kurilin S.P., Denisov V.N., Dli M.I., Bobkov V.I. A Method for the Operational Diagnostics of Induction Motors. *AIP Conference Proceedings*. 2176(1):040008. 2019. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.5135157> (accessed 15.05.2020)
6. Borisov V.V., Dli M.I., Bobkov V.I. Model kompleksnogo upravleniya riskami pri obespechenii resurso- i energosberezheniya protsessov na primere slozhnykh teplotekhnologicheskikh sistem [An Integrated Risk Management Model in Setting Up Resource and Energy Saving Processes Taking Complex Thermal Processing Systems as an Example]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI], 2019, no. 5, pp. 101 – 109.
7. Fomin I., Ivaschenko V., Shulga T. The Mathematical Models and Algorithms of Operational Control for Equipment TPP. *Journal of Applied Informatics*, 2018, vol. 13, no. 3 (75), pp. 24–34.
8. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoiania elektrodvigateli. Metod spektralnogo analiza

potrebliaemogo toka [Analysis of an Electrical Motor. Method of Spectral Analysis of Consumed Current]. *Novosti Elektrotehniki* [Electrical Engineering Transactions], 2005, no. 1 (31), pp. 50–52.

9. Yu M., Lee M. Fault Detection and Isolation in a Nonlinear Electromechanical System. *International Sensing, Diagnostics, Prediction and Control (SDPC) Conference*. 2017, pp. 264-268. DOI: 10.1109 / SDPC.2017.58.

10. Veresnikov G.S., Skryabin A.V. A System for Monitoring the Technical Condition of an Electromechanical Drive based on Data Mining Methods. *Eleventh International Conference on Management of Large-Scale Development of Systems. (MLSD)*. 2018, pp. 1–4 DOI: 10.1109 / MLSD.2018.8551829.

11. Paliukh B.V., Shprekher D.M., Bogatikov V.N. Diagnostirovanie elektromekhanicheskikh sistem

na osnove neirosetevykh tekhnologii [Electromechanical Systems Diagnosis based on Neural Network Technologies]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software and Systems], 2015, no. 3 (111), pp. 5–11. DOI: 10.15827/0236-235X.111.005-011

12. Shprekher D.M., Kolesnikov E.B. The Remote Method of Diagnosing the Technical Condition of Complex Electromechanical Systems. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2018, pp. 1–3, DOI: 10.1109/ FarEastCon.2018.8602600.

13. Semenov V., Lebedev I., Sukhoparov M. Identification of the State of Individual Elements of Cyberphysical Systems based on External Behavioral Characteristics. *Journal of Applied Informatics*, 2018, vol. 13, no. 5 (77), pp. 72–83.